

차동전류 보호계전을 위한 변압기 특성분석

⁰김명철*, 강상희*, 이승재*, 김기화*
명지대학교 전기공학과*

김일동**
전력기술연구원**

Analyses of Transformer Characteristics for Current Differential Protective Relaying

⁰Myeong-Cheol Kim*, Sang-Hee Kang*, Seung-Jae Lee*, Ki-Hwa Kim* Il-Dong Kim**
MyongJi Univ* KEPRI**

Abstract : Simulation methods using EMTP to analyze power transformer transient characteristics and their interesting results are presented in this paper. Because of the transformer saturation including initial inrush, the conventional current differential relay with harmonic restraint module does not provide a clear distinction between internal faults and other conditions. Providing the bases to develop a new relaying concept for power transformer protection, transformer nonlinear transient characteristics are analyzed.

1. 서론

전력용 변압기의 보호에는 차동전류에 기초한 보호계전기가 사용되고 있다. 이는 변압기의 변압비를 고려한 1, 2차측 전류가 Kirchhoff의 전류 법칙을 만족하는 가로 내부 사고의 여부를 판단하는 것이다 [1]. 그러나, 변압기의 특성상 차동전류 기법만으로는 내부 사고 여부를 판단하기가 어렵다. 이와 같은 원인으로는 여자 시와 같은 변압기 단자 전압의 급변으로 인한 전류 불균형, 단자 전압의 상승이나 주파수 저하 등이 초래하는 변압기 과여자에 기인한 여자 전류의 증가, 외부 사고시 변압기 포화에 의한 계전 전류의 불일치, 변압기 권선의 사고 위치에 따른 내부 사고시의 차동전류의 큰 편차 등이 있다. 기존의 차동전류 계전기는 불일 전류는 2고조파 억제 기능으로, 과여자는 5고조파 억제 기능으로, 변압기 포화나 변압기를 포함한 변압기 1, 2 차측의 특성차 등은 비유 차동 요소로 대응하였다 [2] [3]. 그러나, 변압기 효율의 증대, 고압화 및 저중화에 의한 계통의 정전 용량 증대 등과 같은 계통 조건의 복잡화로 기존의 억제 기능을 포함한 비유 차동 계전 방식으로는 효과적일 변압기 보호가 어려워지고 있다. 따라서 본 논문에서는 기존의 차동전류 방식이나 비지 추론을 이용하는 인공지능형 계전기의 알고리즘 개발에 기본이 되는 변압기의 각종 과도 특성분석을 수행하였다. 모델링에는 EMTP가 사용되었고, 보조 프로그램으로는 내부 사고 모델에는 BCTRAN이, 포화 모델에는 HYSDAT가 사용되었다. 본 논문은 다양한 계통 조건 하에서 변압기의 여러 가지 과도 현상을 EMTP로 모의할 수 있을 것을 보였다.

2. 변압기 과도 현상

2.1 내부 사고

변압기의 내부 사고는 권선 내부의 사고인 권선 지락 사고와 층간 단락 사고, 그리고 상간 단락 사고로 나눌 수 있다. 이러한 내부 사고의 원인은 과부하, 과전압에서의 운전, 고/저주파수에서의 운전, 변압기 외부 계통에서의 사고 그리고 기계적 결합 등을 들 수 있다.

2.2 여자돌입 전류

여자돌입 전류는 변압기를 투입할 때 발생하며 크기는 정적 전류의 최대 8 ~ 30배까지 발생한다. 이러한 여자돌입 전류는 변압기 용량, 계통 전압, 계통 저항과 변압기 손실, 자심의 재료, 전류 자속, 위상각, 특히 변압기의 투입각에 의존하며 그 크기는 지수 함수적으로 감소한다[1 - 4].

2.3 과여자

변압기의 과여자는 1차측의 과전압에 의해 발생하며, 높은 자속에 의해 철심을 열손상시킬 수 있고, 많은 맥동이 전류 (eddy current) 손실의 원인이 된다. 심한 과여자는 변압기에 급속한 손상을 주고 고장을 발생시킬 수 있다. 이러한 과여자 현상에서는 기수 고조파, 특히 5고조파가 많이 발생한다.

2.4 외부 사고

과여자와 마찬가지로 정상 상태에서도 적은 양이지만 차동전류가 발생하고, 변압기의 외부에서 상간 단락 등의 사고가 발생한 경우에는 통과 전류에 dc 성분이 포함되어 있어서 더욱 많은 양의 차동전류가 발생하며, 점차로 증가한다.

3. 변압기 과도 현상 모델링

3.1 내부 사고 모델링

주어진 계통을 모델링 하려면 권선, 주파수, 용량 등의 전원 데이터와 단위 길이당 임피던스, 거리 등의 송전선 데이터, 용량, 전압비, 결선 구조 등의 변압기 데이터, 그리고 임피던스, 역률 등의 부하 데이터가 기본적으로 필요하다. 또 내부 사고 모의를 위한 EMTP내의 보조 프로그램인 BCTRAN의 입력 데이터로 여자 시험 데이터와 단락 시험 데이터의 손실, 전류, 전압의 정상분과 영상분이 부가적으로 필요하다. 이 데이터들로 3상 BCTRAN을 수행하면 6개 권선의 데이터가 생기는데 이 것을 행렬식으로 표시하면 아래와 같다.

$$R = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} \\ M_{21} & L_2 & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{31} & M_{32} & L_3 & M_{34} & M_{35} & M_{36} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & L_4 & M_{45} & M_{46} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & L_5 & M_{56} \\ M_{61} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_6 \end{bmatrix}$$

사고를 모의할 권선의 사고 점을 만들기 위해 한 권선을 n개의 권선으로 분리한다. 예로 권선 1을 세 개의 권선 a와 b, 그리고 c로 분리할 때의 계산 순서와 방법은 다음과 같다.

1) 지향 R₁으로부터 R_a, R_b, R_c 계산

$$R_a = \frac{n_a}{n_1} \times R_1, \quad R_b = \frac{n_b}{n_1} \times R_1, \quad R_c = \frac{n_c}{n_1} \times R_1$$

R : 권선 i의 저항, n : 권선 i의 권선수

2) 자기 인덕턴스 L_a, L_b, L_c 과 상호 인덕턴스 M_{ab}, M_{bc}, M_{ca} 의 초기값 설정

$$L_a = \left(\frac{n_a}{n_1}\right)^2 L_1, \quad L_b = \left(\frac{n_b}{n_1}\right)^2 L_1, \quad L_c = \left(\frac{n_c}{n_1}\right)^2 L_1$$

$$M_{ab} = \left(\frac{n_a n_b}{n_1^2}\right) L_1, \quad M_{bc} = \left(\frac{n_b n_c}{n_1^2}\right) L_1, \quad M_{ca} = \left(\frac{n_c n_a}{n_1^2}\right) L_1$$

L_i : 권선 i 의 자기 인덕턴스, M_{ij} : 권선 i 와 j 의 상호 인덕턴스

3) 누설율 $\sigma_{a(b+c)}, \sigma_{(a+b)/c}, \sigma_{(a+c)/b}$ 계산

$$\sigma_{a(b+c)} = \frac{L_{La}}{L_{a+(b+c)} \cdot \left(\frac{N_a}{N_a + N_{b+c}}\right)}$$

$$L_{a+(b+c)} = L_a + L_{(b+c)} + 2M_{a(b+c)}$$

다른 두 개도 같은 방법으로 구한다.

$$L_{La} = L_{L1} \times \left(\frac{n_a}{n_1}\right)^2, \quad L_{L(b+c)} = L_{L1} \times \left(\frac{n_b + n_c}{n_1}\right)^2$$

L_{Li} : 권선 i 의 누설 인덕턴스

4) $L_a, L_b, L_c, M_{ab}, M_{bc}, M_{ca}$ 계산

$$L_a + L_b + L_c + 2(M_{ab} + M_{bc} + M_{ca}) = L_1$$

$$\frac{L_a}{L_b} = \left(\frac{n_a}{n_b}\right)^2$$

$$\frac{L_a}{L_c} = \left(\frac{n_a}{n_c}\right)^2$$

$$\sigma_{a(b+c)} = 1 - \frac{(M_{ab} + M_{ca})^2}{L_a(L_b + L_c + 2M_{bc})}$$

$$\sigma_{(a+b)/c} = 1 - \frac{(M_{ca} + M_{bc})^2}{L_c(L_a + L_b + 2M_{ab})}$$

$$\sigma_{(a+c)/b} = 1 - \frac{(M_{ab} + M_{bc})^2}{L_b(L_a + L_c + 2M_{ca})}$$

5) M_{ai}, M_{bi}, M_{ci} 계산 ($a > b \geq c$)

$$M_{ai} = M_{Li} \sqrt{\frac{L_a}{L_1}} \cdot \sqrt{\frac{1 - \sigma_{ai}}{1 - \sigma_{Li}}}$$

$$M_{bi} = M_{Li} \sqrt{\frac{L_b}{L_1}} \cdot \sqrt{\frac{1 - \sigma_{bi}}{1 - \sigma_{Li}}}$$

$$M_{ci} = M_{Li} - (M_{ai} + M_{bi})$$

위의 계산 과정을 통하여 8개의 권선 데이터를 구하고 이 것을 EMTP 입력 파일의 변압기 부분에 사용한다 [5].

3.2 변압기 포화 모델링

여자돌입과 과여자 모의를 위해서는 기본 데이터 외에 누설 용량과 자화 곡선의 포화점 데이터가 부가적으로 필요하고, 외부 사고 모의를 위해서는 다른 데이터가 별도로 필요하지 않다. 포화 변압기는 이상 변압기와 등가 회로로 나타낼 수 있고 등가 회로는 직렬 저항과 인덕턴스, 그리고 여자 가지로 모델링할 수 있다. 변압기의 히스테리시스 특성은 본 논문에서 사용한 Type-96 소자를 이용하여 모델링할 수 있다. 이 소자를 이용하기 위해서는 히스테리시스 데이터가 필요한데, 이를 얻는 방법은 실험에 의한 방법과, 계산하여 얻는 방법 등 두 가지가 있다. 계산하여 얻는 방법은 제작자에 의해 제공된 V-I 곡선으로부터 EMTP내의 보조 프로그램인 HYSDAT를 이용하여 히스테리시스 특성을 얻는 것이다. HYSDAT를 이용하기 위해서는 철심의 재질, 원하는 히스테리시스 곡선의 등급, 포화점의 자속과 전류 등 4개의 데이터가 필요하다. EMTP에서는 'ARMCO M4 oriented silicon steel' 한 가지의 철심 모델만을 제공한다. 포화점은 정상 상태 전압의 140%로 하여 자속과 전류를 계산하는데, 이때의 여자 전류는 정격 전류의 45%이고 정격에서의 누설 전류는 정격 전류의 0.3%이다 [1].

4. 사례 연구 및 결과 분석

4.1 데이터 및 파라미터

4.1.1 모델 계통

아래의 그림 1과 같은 2개의 등가 전원을 갖는 계통을 사용하였다. 먼저 전원 데이터는 정격 전압이 154 kV, 주파수가 60Hz, 용량이 3GVA와 2GVA이고, 송전선 데이터는 단위 길이당 저항 $R' 0.3088 \Omega/\text{km}$, 인덕턴스 $L' 3.473 \text{ mH}/\text{km}$, 캐패시턴스 $C' 20.0038 \mu\text{F}/\text{km}$ 이고, 거리는 각각 40km와 25km로 하였다. 변압기는 용량이 60MVA, 전압비가 154/22.9 kV/kV, Y-Y 결선 구조를 갖는 변압기이고 부하의 용량도 60MVA로 시뮬레이션을 하였다. 또한 내부 사고를 위해서 변압기 1차측 권선 1을 100으로 했을 때, 권선 a = 50, b = 30, c = 20이고, 1차측 권선과 2차측 권선은 철심의 같은 leg에 감겨 있는 모델을 사용하였다. 그리고 외부 사고는 Type-96 소자를 사용한 변압기 포화 모델에서 모의하였다.

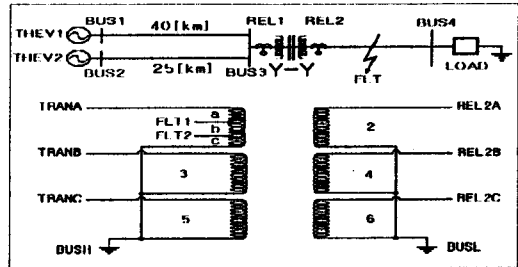


그림 1 모델 계통도와 변압기 결선도

4.1.2 내부 사고

BCTRAN을 위한 여자 시험 데이터와 단락 시험 데이터는 아래의 표와 같고 파라미터로 역률은 1.0과 0.6, 사고시 위상을 0°와 90°로 하였다.

표 1 BCTRAN의 입력 데이터

정상	손실	여자 시험 데이터		단락 시험 데이터	
		[kW]	[A]	[kW]	[A]
전류	1.977			224.965	
전압	22.817			41.082	
영손실	197.702			15.129	
전류	413.6			102.86	
전압	2.452			3.337	

4.1.3 여자돌입

여자돌입과 과여자를 위한 데이터는 누설 용량이 1·2차측 각각 5%이고 포화점의 자속과 여자 전류는 아래와 같다.

$$\text{정격 전류 } I_{rat} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_1} = 224.942 \text{ [A]}$$

$$\text{포화점 누설자속 } \lambda = \frac{\sqrt{2} \cdot V_1 / \sqrt{3}}{2\pi f} \times 1.4 = 466.941 \text{ [Wb]}$$

$$\text{포화점 여자전류 } I_e = \sqrt{2} \cdot I_{rat} \times 0.45 = 143.152 \text{ [A]}$$

$$\text{베이스 임피던스 } Z_{base} = \frac{V_1^2}{S} = 395.267 \text{ [\Omega]}$$

$$\text{누설 임피던스 : 1차측 } Z_{1l} = Z_{le} \times lc = 52.423 \text{ [mH]}$$

$$\text{2차측 } Z_{2l} = \frac{Z_{1l}}{n^2} = 3.0747 \text{ [mH]}$$

파라미터로는 여자돌입에서 역률 1.0과 0.6, 투입각 0°와 90°, 외부 사고에서 같은 역률과 사고 위상각 0°와 90°를 사용하였고, 과여자에서는 역률을 0.9로 고정시키고 과전압의 크기를 110, 120, 130, 140%로 변화하여 모의하였다.

4.2 결과 분석

고조파 분석에 사용된 알고리즘은 DFT이고 기본파, 2고조파 그리고 5고조파를 중심으로 분석해 보았다.

$$X_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-j2\pi \frac{kn}{N}} \quad (n: \text{고조파 차수})$$

표 2 차동전류의 고조파 분석

종류	파라미터	T ₁ (사고후 1주기후)			T ₂ (사고후 1.5주기후)		
		기본파	2고조파	5고조파	기본파	2고조파	5고조파
내부 지락	0°	8218.3	984.14	424.97	8379.6	487.10	208.07
	90°	7800.7	218.59	121.72	8426.0	103.70	44.442
권선 단락	0°	9247.9	864.52	390.33	11603.8	450.22	186.58
	90°	9247.9	864.52	390.33	11603.8	450.22	186.58
중간 단락	30°	7829.0	1065.8	473.39	7822.9	318.99	137.66
	90°	7005.8	427.00	211.80	8029.3	123.66	53.669
	0°	8075.8	1064.3	461.06	8182.0	419.73	179.98
	90°	7457.2	315.21	163.19	8286.3	119.50	51.446
외부 사고	0°	14.281	3.9020	2.4056	14.190	3.8872	2.4603
	90°	11.738	0.8573	1.5181	12.801	0.7019	1.6554
여자 돌입	0°	650.96	420.87	58.553	576.05	396.77	31.788
	90°	11.699	1.1582	1.4550	13.324	0.9247	1.7299
과여자	110%	13.790	0.0144	2.3665	13.790	0.0225	2.3651
	120%	16.528	0.0477	3.5204	16.528	0.0440	3.5189
	130%	21.745	0.0441	5.9881	21.744	0.0394	5.9880
	140%	126.92	101.878	48.772	123.56	98.470	49.458

위의 표는 역률 1.0에서 각 사고별로 분석된 차동전류의 고조파의 양을 나타낸다. T₁는 사고가 일어난 순간부터 한 주기의 값을 DFT한 결과이고, T₂는 사고 발생 후 1/2 주기가 지난 후부터의 한 주기 값을 DFT한 결과이다. 여자돌입에서는 사고 순간 대신에 변압기 투입 시간을 기준으로 하였고, 과여자에서는 처음부터 전원에 과전압을 가하여 모의하였다.

권선 1의 FLT1 지점 단락을 모의한 내부 지락 사고에서는 사고 전 발생하지 않았던 고조파가 사고 발생 직후 한 주기 동안은 0° 사고시 2고조파와 5고조파가 기본파의 각각 12%와 5.2%, 90° 사고시 2.8%와 1.2%가 발생하지만 반주기 후 1/2 이하로 감소함을 알 수 있고, 변압기 입력단의 a상과 b상의 단락 사고를 모의한 권선 단락 사고에서는 a상과 b상의 위상차에 관계없이 2고조파가 기본파의 9.3%, 5고조파가 기본파의 4.2%가 발생하고 마찬가지로 반주기 후 1/2 이하로 감소함을 알 수 있다.

중간 단락은 권선의 30%와 50%가 각각 단락이 되는 사고를 모의하였는데, 2고조파가 기본파의 13.9%와 13.2%로, 5고조파가 기본파의 6.05%와 5.71%로 다른 내부 사고보다 많이 발생하며, 반주기 후에 1/3 이하로 급격히 감소함을 알 수 있다.

포화 모델을 사용한 외부 사고는 변압기 2차측의 a상과 b상의 단락을 모의하였는데, 정상 상태에서도 약간 포화가 되어 차동전류가 정격 전류의 5%정도 발생함을 알 수 있다. 2고조파는 기본파의 약 24%, 5고조파는 기본파의 약 17% 정도 발생하여 반주기 후에도 거의 감소하지 않음을 알 수 있다.

여자돌입에서는 전압의 위상이 0° 인 시간에서 변압기를 투입하였을 때에는 5고조파가 기본파의 9% 이하로 발생하는데 비하여 2고조파가 기본파의 64%이상으로 상당히 많이 발생하여 감소하지 않음을 알 수 있고, 90° 에서 변압기를 투입한 경우에는 2고조파가 기본파의 10% 미만으로 0° 에 투입한 경우보다 매우 적고 조금씩 감소하며, 이에 반하여 5고조파가 기본파의 13%정도로 조금 더 발생함을 알 수 있다.

이와는 다르게 과여자에서는 2고조파가 기본파의 0.4% 이하로 매우 적으며, 5고조파는 기본파의 17% 이상으로 많이 발생하며 과전압이 증가할수록 증가함을 알 수 있다. 그러나 과전압이 140% 인가되면 변압기가 과포화 되어 2고조파가 기본파의 80% 정도로 매우 많이 발생하고, 5고조파는 35%이상 발생함을 알 수 있다.

표에는 나타나 있지 않지만 부하의 용량이 일정할 때, 역률을 0.6으로 하여 동일한 사고를 모의하여 고조파 분석도 하였다. 역률이 1.0에서 0.6으로 변하였을 때 차동전류의 양은 조금 차이가 있지만, 기본파 및 고조파의 특성은 크게 달라지지 않음을 알 수 있다.

사고전 2주기부터 사고후 2주기의 차동전류의 값을 DFT한 결과의 몇 가지 경우의 그림들이 아래에 있다. 수평축은 시간축, 수직축은 전류의 양을 나타낸다.

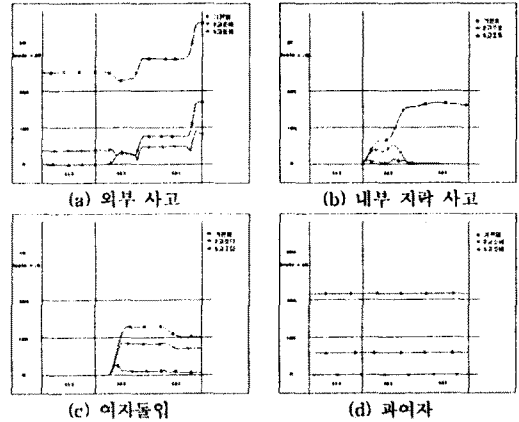


그림 2 차동전류의 기본파 및 고조파

그림 2 (a)는 사고 위상각이 0° 일 때 외부 사고의 경우이다. 정상 상태에서도 변압기가 약간 포화되어 차동전류와 5고조파가 있고, 사고 후 발생한 dc의 영향으로 차동전류가 증가함을 알 수 있다. 그림 2 (b)는 사고 위상각이 90° 일 때의 내부 지락 사고의 차동전류의 고조파를 도시한 것이다. 사고 발생 후 차동전류와 고조파가 발생하여 증가하지만, 차동전류는 수렴하고, 고조파는 한 주기 이내에 소멸함을 알 수 있다. 그림 2 (c)에는 0° 에서 변압기를 투입한 경우의 여자돌입에 의한 차동전류를 보였다. 사고 후에 급격히 증가한 차동전류는 매 주기마다 조금씩 감소함을 알 수 있고, 2고조파가 60%이상 매우 많이 발생하여 지속됨을 알 수 있다. 그림 2 (d)는 과전압이 130% 인가되었을 때의 차동전류 그림이다. 차동전류와 5고조파의 양이 일정함을 알 수 있고, 다른 그림에 비해 5고조파가 상당히 많이 발생함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 EMTP를 이용하여 여러 가지의 변압기 사고와 외부 사고, 여자돌입 그리고 과여자가 모의되었고, 위상과 역률 등을 파라미터로 하여 정상 상태 및 과도 상태의 고조파 특성이 분석되었다. 제시된 방법으로 주어진 사례 외에도 여러 가지의 변압기 과도 특성이 연구 중이다. 필요한 변압기의 데이터를 얻기 힘들다는 문제점이 있지만 데이터를 확보한 경우, 변압기의 다양한 과도 특성을 쉽게 모의 분석할 수 있다는 장점이 있다. 앞으로 추가할 사항으로는 철심내의 잔류 자속의 변화에 따른 여자돌입 전류와 변류기의 오차 등에 따른 차동전류의 특성분석 등이 있다.

6. 참고 문헌

- [1] Walter A. Elmore, "Protective Relaying Theory and Applications", ABB Power T&D Company Inc., 1994, pp. 145 - 165.
- [2] C. E. Lin, C. L. Cheng, C. L. Huang and J. C. Yeh, "Investigation of Magnetizing Inrush Current in Transformers. Part I - Numerical Simulation", IEEE Trans. on PWRD. Vol. 8, No. 1, Jan. 1993, pp. 246 - 254.
- [3] C. E. Lin, C. L. Cheng, C. L. Huang and J. C. Yeh, "Investigation of Magnetizing Inrush Current in Transformers. Part II - Harmonic Analysis", IEEE Trans. on PWRD. Vol. 8, No. 1, Jan. 1993, pp. 255 - 263.
- [4] Jung-Chien Li and Yan-Pei Wu, "FFT Algorithms for The Harmonic Analysis of Three-Phase Transformer Banks with Magnetic Saturation", IEEE Trans. on PWRD. Vol. 6, No. 1, Jan. 1991, pp. 158-165.
- [5] P. Bastard, P. Bertrand and M. Meunier, "A Transformer Model for Winding Fault Studies", IEEE Trans. on PWRD. Vol. 9, No. 2, Apr. 1994, pp 690 - 699.